

높은 입력 경 부하 역률 향상을 위한 CCM Boost PFC 컨버터 제어 기법

윤한신, 이재범, 백재일, 문건우
카이스트 전기 및 전자공학과

A CCM boost PFC control technique for PF Improvement in high line and light load conditions

Han-Shin Youn, Jae-Bum Lee, Jae-Il Baek, Gun-Woo Moon

Department of Electrical Engineering KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 단상 CCM boost PFC 컨버터의 높은 입력 경부하 역률 향상을 위한 제어 기법을 제안한다. 기존 CCM boost PFC 제어기법은 인덕터 전류를 입력 전류와 동기화 하여 제어 하여 낮은 입력 또는 중 부하 이상에서 높은 역률을 얻을 수 있다. 하지만 높은 입력 전압 조건에서 경 부하 동작 시 EMI 필터에 의해 발생하는 무효 전류로 인하여 입력 전류를 위상이 앞서게 되고 역률이 큰 폭으로 저하된다. 제안하는 제어 기법은 전류 지령 보정과 더불어 개선된 시비율 전향 기법을 이용하여, 높은 입력 전압에서 경 부하 동작 시 입력 전류의 위상을 입력 전압과 동기화 시켜 높은 역률을 얻는다. 따라서 제안하는 제어기법의 경우 전 입력 및 전 부하 조건에서 단위 역률에 근접한 역률을 얻을 수 있으며, 이는 높은 신뢰성을 위해 병렬로 구성된 high-end 파워 시스템에 적합하다.

1. 서론

최근 들어 클라우드 서비스의 활성화로 데이터 트래픽이 2012년 3.1ZB에서 2018년 8.6ZB로 급격히 증가할 것으로 예상되고 있다. 이를 위해 많은 수의 데이터 센터들이 설립되고 있으며, 또 서버용 전원 장치 시장 또한 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 서버용 전원 장치들은 신뢰성 향상을 위해 병렬로 구성되어 있을 뿐만 아니라, 심야에는 데이터의 트래픽이 급감함에 따라, 상당 시간 동안 10%이하의 경 부하에서 동작하게 된다. 따라서, 최근에는 80PLUS® 및 전원 장치 공급자들은 중 부하 이상 조건뿐만 아니라 경 부하 조건에서도 높은 전력 품질을 요구 하고 있다^[1].

강화되고 있는 역률 규제를 만족하기 위해 서버용 전원장치에서는 입력에 CCM Boost PFC단을 적용하고 있다. 또 최근 디지털 제어기 시장확대에 따라 디지털 제어기를 통해 인덕터 전류를 입력 AC 전압과 동일하도록 제어하는 알고리즘이 개발 되고 있다^{[2], [3]}. 이러한 기존의 제어기법들은 입력 전압이 낮거나 중 부하 이상 동작 시에는 높은 역률을 달성 할 수 있으나, 높은 입력 전압에서 10% 이하 경 부하 동작 시 역률이 급격하게 저하 된다. 이는 스위칭 노이즈 및 EMI를 저감하기 위하여 PFC 단 입력에 적용된 EMI 필터가 순환하는 무효 전류를 발생시켜, 입력 전류의 위상을 입력 전압에 비해 앞서게 만든다. 더욱이 EMI 필터에 의해 발생하는 무효 전류는 인덕터 전류를 입력 AC 전압과 동기화 시키는 기존 제어기법들로는 보상이 불가능 하여 역률의 저하를

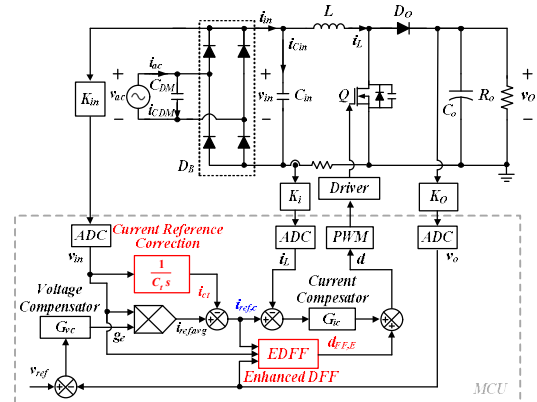


그림 1. 제안된 제어기 블록 다이어그램

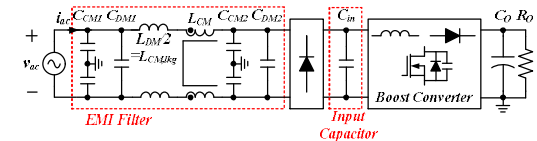


그림 2. EMI필터가 적용된 PFC 부스트 컨버터

피할 수 없다.

본 논문에서 제안된 제어기법은 앞서 언급한 기존 제어기의 단점을 그림 1. 전류 지령 보정과 개선된 시비율 전향기법을 통해 보완하고자 한다. 전류 지령 보정기는 EMI 필터로부터 발생하는 순환 무효 전류를 예측하여 입력 AC 전류가 입력 AC 전압과 위상이 같도록 전류 지령을 보정을 한다. 또 개선된 시비율 전향 보상 기법은 입력 전압, 출력 전압과 보정된 전류 지령에 의해 발생하는 왜란을 효과적으로 제거하여 높은 역률을 얻을 수 있도록 한다. 따라서 제안된 제어기법은 CCM boost PFC의 높은 입력 전압 경 부하 동작 시 역률을 크게 향상시켜, 전 입력 전 부하에서 단위 역률에 근접한 역률을 달성할 수 있다.

2. 제안된 높은 입력 경부하 역률 향상 기법

제안된 제어기는 앞서 언급하였듯이, 전류 지령 보정과 개선된 시비율 전향 보상으로 인해 입력 AC 전류와 입력 AC 전압을 항상 동위상으로 제어하여 모든 입력과 부하에서 높은 역률을 달성할 수 있다.

2.1 전류 지령 보정기

일반적으로 CCM boost PFC는 자성체를 최소화 하기 위해 CM 커패시터(C_{CM})와 CM 초크(L_{CM}), DM 커패시터(C_{DM})

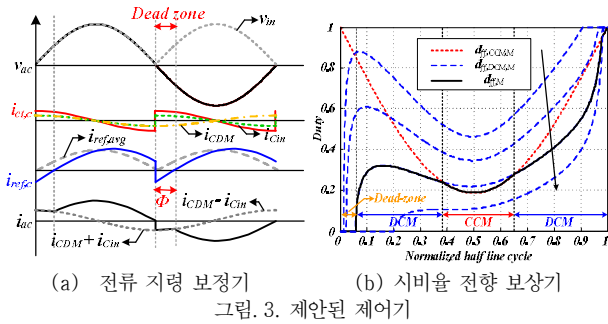


그림. 3. 제안된 제어기

및 입력 커패시터(C_{in})을 이용한 그림. 2와 같은 C-L-C 구조를 널리 사용하고 있다^[4]. 이 중 CM 필터의 경우 작은 C_{CM} 과 차동 결합된 L_{CM} 으로 인해 입력 전류에 영향이 무시할 만큼 적다. 하지만 C_{DM} 과 C_{in} 의 경우 인덕터의 전류의 맥동을 저장하므로 무효 순환 전류를 발생시켜 이에 대한 보상이 필요하다. 필터의 무효 전류를 보상하기 위해서는 EMI 필터의 무효 전류 위상을 상쇄시키는 방향으로 인덕터의 전류의 위상이 변하여야 한다. 그림. 1의 전류 제어가 인덕터 전류가 전류 지령을 올바르게 추종 한다 가정하면, 식 (1)과 그림. 3.(a)와 같이 전류 지령에 무효 전류 차이 만큼 전류 지령 보정을 통해 EMI 필터의 무효 전류를 보상할 수 있다.

$$i_{ref,c}(t) = i_{ref,avg}(t) - i_c(t) = i_{ref,avg}(t) - (C_{DM} + C_{in}) \frac{dv_{in}(t)}{dt}. \quad (1)$$

따라서 제안된 제어기는 전류 지령 보정기를 통해 높은 입력 경 부하에서도 높은 역률을 달성 할 수 있다.

2.2 개선된 시비율 전향 보상기

디지털 제어를 이용한 PFC의 경우 S&H 및 시지연으로 전류 제어기의 제어 주파수가 제한이 된다. 따라서 전류에 왜곡이 발생을 피할 수 없으며, 이를 위해 시비율 전향 보상기를 적용하여 왔다^{[2], [3]}. 하지만 기존의 시비율 전향 보상기는 입력 AC 전압과 동위상인 인덕터 전류를 제어하기 위해 제안되었기 때문에 보정된 전류 지령을 추종하기에는 부적합하다. 따라서 식 (2), (3)과 그림. 3.(b) 같은 개선된 시비율 전향 보상기를 제안한다.

$$d_{ff,CCM,E}(t) = \frac{V_o - \langle v_{in}(t) \rangle}{V_o} \approx \frac{V_o - v_{in}(t)}{V_o}, \quad (2)$$

$$d_{ff,DCM,E}(t) = \frac{2L \langle i_{ref,c}(t) \rangle \left(\frac{V_o - \langle v_{in}(t) \rangle}{V_o} \right)}{d(t) T_s \langle v_{in}(t) \rangle} \approx \sqrt{\frac{2L d_{ff,CCM,E}(t)}{T_s R_{ec}(t)}}, \quad (3)$$

개선된 시비율 전향 보상기는 그림. 3.(b)에서 확인 가능 하듯이 입력 반주기 시작시의 전향 보상된 시비율이 0에서부터 시작하여 입력 반주기가 끝에서는 시비율 1이 전향 보상된다. 따라서 제안된 개선된 시비율 보상기의 경우 보정된 전류 지령을 추종하기에 적합하며, 입력 전압, 출력 전압 및 보정된 전류 지령으로부터 발생될 수 있는 왜란을 효과적으로 감쇄하여 전류 왜곡을 최소화 할 수 있다. 따라서 제안된 제어기법은 전 입력 및 전 부하에 높은 역률을 획득할 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 제어기를 입력 230V_{ac} 출력 750W CCM boost PFC를 시제품에 적용 하여 그 유효성을 검증하였다. 그림 4에서 확인 가능 하듯이 높은 입력 전압 경 부하 조건에서 제안된 제어기는 입력 AC 전압과 전류가 같은 위상을 가지도록 제어되고 있다.

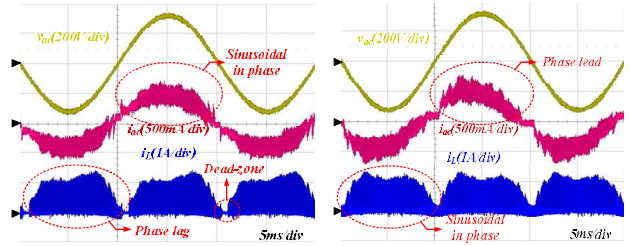


그림. 4. 입력 230V_{ac} 출력 750 시제품 10%부하 실험 파형

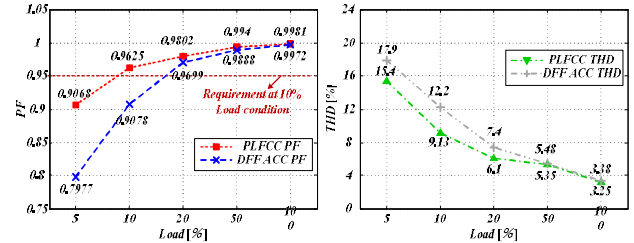


그림. 5. 230V_{ac}에서 PF 및 THD 측정치

그림 5는 기존 제어기와 제안된 제어기의 PF와 THD 측정치를 보여준다. 제안된 제어기는 전 부하 조건에 높은 역률을 보이고 있으며, 특히 경 부하 시 기존 제어기법에 비해 높은 전력 품질을 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 EMI 필터에 의해 발생하는 무효 전류를 경감하여 높은 입력 경 부하 시 높은 역률을 가지는 제어기법을 제안하였다. 또한 제안된 제어기를 750W급 시제품에 적용하여 그 효과성을 검증하였다. 따라서 제안된 제어기는 전 입력, 전 부하에서 높은 전력 품질을 가질 수 있어 서버용 전원 장치와 같이 고성능 전원 장치의 PFC 단 제어기법으로 적합하다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] 80 Plus Program. [Online]. Available: <http://www.pluginloadsolutions.com/80PlusPowerSupplies.aspx>
- [2] K. D. Gussemé, D. M. V. de Sype, A. P. V. den Bossche, and J. A. Melkebeek, "Digitally controlled boost power-factor-correction converters operating in both continuous and discontinuous conduction mode," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 1, pp. 88-97, Feb. 2005.
- [3] S. F. Lim and A. M. Khambadkone "A simple digital DCM control scheme for boost PFC operating in both CCM and DCM", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 4, pp.1802 -1812 2011.
- [4] Y. Levron, H. Kim, and R. W. Erickson, "Design of EMI Filters Having Low Harmonic Distortion in High -Power -Factor Converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 7, Jan. 2014.